

2019 年度 学位論文（修士）

無人機交通管理の飛行計画段階での
承認便数の改善の試み

2020 年 1 月 24 日

首都大学東京大学院
システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
航空宇宙システム工学域 博士前期課程

17891510 貝田 亮介

指導教員 武市 昇 教授

目次

1. はじめに	2
1.1. 研究背景	2
1.2. 研究目的	2
1.3. 本論文の構成	3
2. シミュレーションの概要	4
2.1. UAS の仕様	4
2.2. シミュレーション空域	4
2.3. 飛行経路	5
2.4. シミュレーション条件	5
3. 飛行禁止区域の回避規則	6
3.1. 最短経路回避	6
3.2. 片側(左側)回避	8
3.3. 片側(左側)迂回回避	9
3.4. 回避規則のまとめ	10
4. シミュレーション結果	13
4.1. 飛行禁止区域の配置と承認便数	13
4.2. 飛行軌跡の可視化	18
4.3. 平均飛行距離と平均承認便数の関係の考察	24
5. まとめと結論	28

1. はじめに

1.1. 研究背景

今日、無人航空機（Unmanned Aircraft System, 以下 UAS）は点検や監視、測量、地図作成、映像撮影、精密農業といったさまざまな分野において商用利用がなされている¹。特に小型の UAS に関しては、運用に必要な設備が従来の航空機に比べて非常に簡素で済むことから、室内や地下といった従来型の航空機では飛行ができなかった場所でも運用することができる。また、捜索救助や補給といった厳しい気象や地理的に飛行が難しい場所でも人命を危険に晒すことなく運用することが可能である。これらの分野に加えて、物流分野においては荷物の配送などへの UAS の活用が期待されており、世界中の運送事業者やインターネット通販事業者などを中心に開発が進められている。このような背景から、UAS の需要は増加傾向にあり、予測を上回るペースで拡大している。多くの UAS は現在、建築物や一部の従来型航空機によってすでに使用されている低高度での運用が想定されており、UAS を大規模に運用していくにあたっては追加の規制が必要であると考えられている。また、操縦士が不在という環境下では、建物や他の UAS との衝突回避の方法が必要であり、個々の UAS が自由に飛行することは衝突や、従来の有人型航空機への接触といった重大な事故につながる危険性がある。そこで、UAS の安全かつ効率的な飛行を実現するような運航システムの開発が必要である。この UAS を対象とした運航システムは UTM System (UAS Traffic Management System) と呼ばれ、世界中で研究がおこなわれている²⁻⁹。

1.2. 研究目的

日本においては航空法の規制から、UAS は飛行前に承認が必要であるため⁴、本研究では UAS の飛行計画作成段階に着目し、より多くの UAS の飛行計画が承認されるような交通規則を考案し、定量的な評価をおこなう。本研究では、飛行計画段階において、後から登録される UAS の飛行計画はすでに登録済みの UAS の飛行計画と干渉しないように登録される。新たに登録される UAS が登録済みの UAS の飛行計画と干渉せずに飛行することができない場合には新しく登録される飛行計画は受理されないものとする。先行研究より、個々の UAS がそれぞれ制限なく飛行する空域や仮想的なチューブの中を飛行するような空域と比べ、各 UAS が定められた高度を飛行する層状の空域は安全性や効率性の点で最も優れているとされている¹⁰⁻¹⁴。そのため、本研究においても層状の空域を想定する。また、空域内には様々な個数や配置の飛行禁止区域を設定する。飛行計画が承認される数は空域の大きさや飛行禁止区域の個数や配置に影響を受けるものと考えられるため、承認便数は UAS が飛行禁止区域を回避する方法の影響を受けるものと考えられる。そこで、本研究では飛行禁止区域の回避規則が承認便数に対して及ぼす影響を数値解析により定量的に解析する。

1.3. 本論文の構成

本論文は、本章を含め 5 章から構成される。

第 2 章では、シミュレーション空域の設計方法や用いる UAS の仕様、飛行をおこなう際の条件、飛行禁止区域の回避規則について説明を行う。

第 3 章では、第 2 章で説明した条件のもとシミュレーションを行った結果を提示し、グラフや図を用いながらそれらの考察を行う。

第 4 章では、得られた結果のうち、平均飛行距離と平均承認便数の関係についてより深い考察を行う。

第 5 章では、本研究の結論を述べる。

2. シミュレーションの概要

2.1. UAS の仕様

本研究で用いる UAS のモデルの飛行距離や飛行速度は DJI 社製の Mavic 2 Pro を参考に決定する¹⁵。Mavic 2 Pro に関する主な仕様を表 1 に示す。

表 1 UAS の仕様

機種名	DJI Mavic 2 Pro
最大離陸重量	907[g]
最大飛行距離	18,000[m] (50[km/h])
最大上昇速度	4 [m/s]
最大下降速度	3 [m/s]
巡航速度	14 [m/s] (\approx 50[km/h])

2.2. シミュレーション空域

航空法による規制や UAS の仕様を考慮し、シミュレーション空域の大きさは縦 10000[m]、横 10000[m]、高さ 150[m]とする。先行研究においては、それぞれの UAS が異なった数通りの高度を飛行するというような、複数の飛行面をもつ空域が想定されている¹⁶⁻¹⁷。日本では、航空法による規制から UAS は高度 150[m]以上を飛行できないことや、地上の建築物や他の UAS から最低でも 30[m]以上の距離を確保して飛行しなければならないことを考慮すると最大で 2-3 面の飛行面を設定することができる。しかしながら、複数の飛行面を設定した場合でも、飛行面の数自体が一面あたりの承認便数に大きな影響を及ぼすことはないと考えられるため、本研究では、図 1 に示すように、飛行面一面あたりの承認便数を明らかにする。飛行面は高度 120[m]に設定する。また、現実の環境では皇居の上空や高層ビル群といった UAS が飛行できない場所が存在する。そこで、これらの影響を加味するために、シミュレーション空間には飛行禁止区域を複数設定する。飛行禁止区域の大きさは縦 1000[m]、横 1000[m]とし UAS の出発地と目的地の間に飛行禁止区域が存在する場合には UAS は回避行動を取らなければならないものとする。飛行禁止区域の数は 10, 20, 30 の 3 通りを想定し、それぞれシミュレーション空域内に無作為に配置する。3 通りの飛行禁止区域の配置個数それぞれにおいては、回避規則によらず、同じ配置を用いることとする。

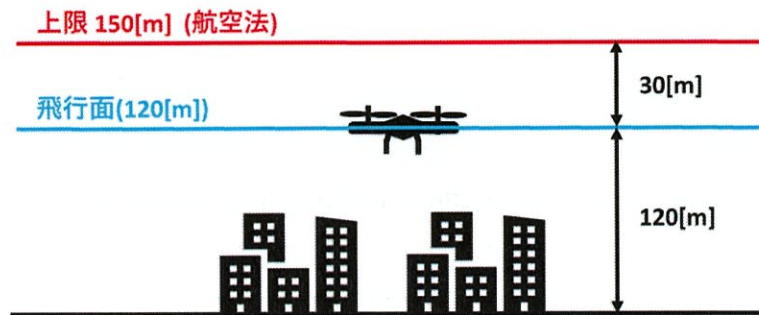


図 1 シミュレーション空域

2.3. 飛行経路

各 UAS の出発地と目的地はシミュレーション空域内において、往復飛行距離が 6-18[km] の範囲に収まる条件下で無作為に決定される。UAS は出発地から飛行高度まで 4[m/s] で垂直に上昇し、14[m/s] で飛行面を水平に目的地上空まで飛行、目的地上空に到達後は 3[m/s] で垂直に降下し、目的地に到達する。復路の飛行経路も同様の手順で作成する。ただし、巡航経路については飛行禁止区域の配置や回避規則によって往路と復路で異なった飛行経路をとる場合があるが、詳細は第 3 章にて、それぞれの回避規則ごとに説明する。このようにして、図 2 に示すような飛行経路を作成する。青で示すのが往路、赤で示すのが復路である。また、目的地到着時刻は飛行開始時刻と飛行終了時刻がシミュレーション時間幅の中に収まる範囲で無作為に決定される。



図 2 飛行経路

2.4. シミュレーション条件

本研究では 2.3 で説明した条件を元に作成した 10000 機の UAS の飛行計画が提出された場合の承認便数に着目する。シミュレーション時間は 3000[sec] とし、他の UAS とコンフリクトを起こさず飛行することが不可能な場合は、その飛行計画は承認されないものとする。これらの条件のもと、10000 機の飛行計画が提出された後の状態を比較する。

3. 飛行禁止区域の回避規則

UAS の飛行経路上に飛行禁止区域が存在する場合、UAS は飛行禁止区域を回避して飛行する。本章では最短経路回避、片側回避、片側迂回回避の 3 つの飛行禁止区域の回避規則を説明する。

3.1. 最短経路回避

最短経路回避では、出発地と目的地との間に飛行禁止区域が存在する場合には、まず時計回り、反時計回りのうち経路の長さが最短になるような回りで飛行禁止区域の縁に沿うようにウェイポイントの候補を設定する。図 3 のような場合においては、出発地から目的地までの往路で 8 つのウェイポイントの候補が生成される。これら 8 つのウェイポイントから不必要なウェイポイントの削除を行う。この場合、WP1 から WP3 へは WP2 を経由することなく飛行できるため、WP2 は削除可能である。同様に WP3 から WP6、WP6 から WP8 へも直接飛行が可能である。このように図 4 に示すように、最初に生成された 8 つのウェイポイントの候補から不必要なウェイポイントを削除し、最適化を行う。不必要なウェイポイントが削除された結果、最終的に図 5 に示すウェイポイントが確定される。この回避規則の問題点として、出発地、目的地及び飛行時間帯が近い複数のフライトが同じ位置にあるウェイポイントに向かってしまい、飛行禁止区域の端がボトルネックとなってしまうことで、承認便数が減少してしまうことが考えられる。この問題を解決するために、図 6 に示すように飛行禁止区域のさらに外側に仮想的なレーンを設け、飛行させることとする。レーンの数には一律の制限を設けず、空域や飛行距離の制限を満たす範囲で拡大していくものとする。

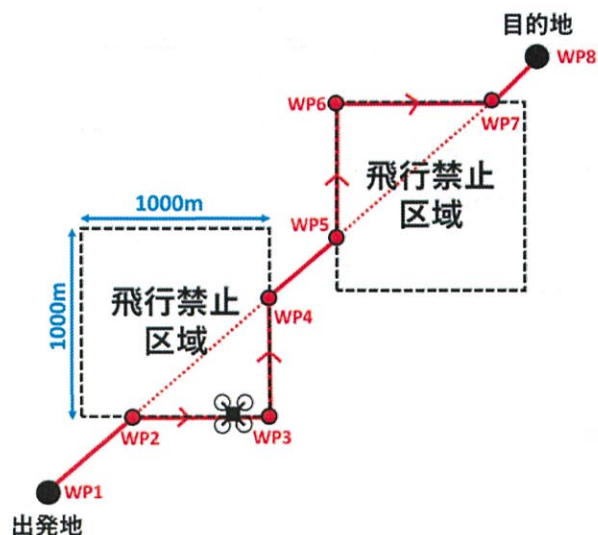


図 3 最短経路回避のウェイポイントの候補

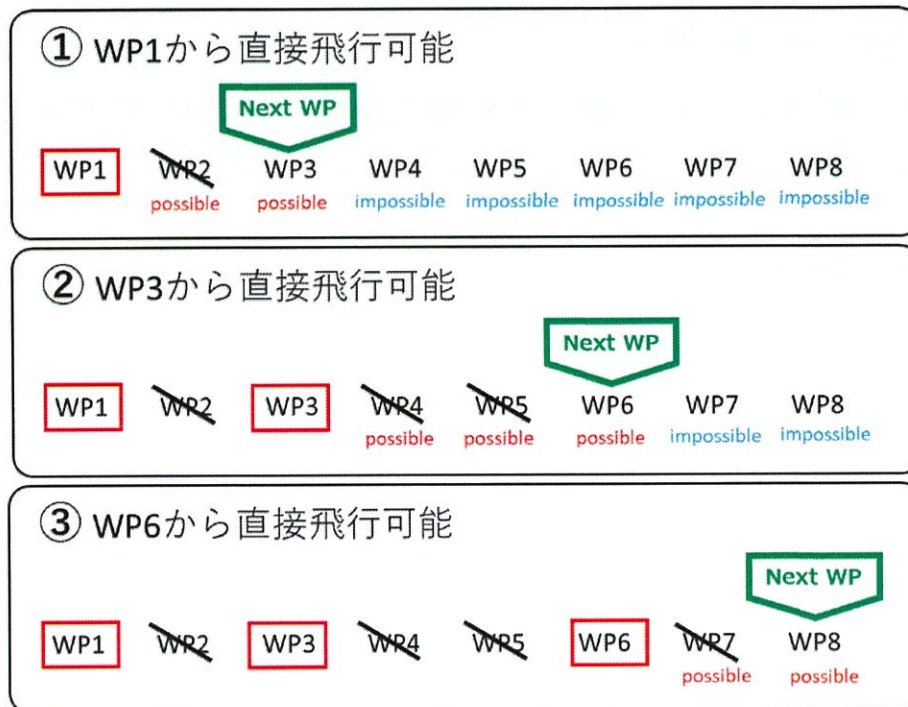


図 4 ウェイポイントの最適化

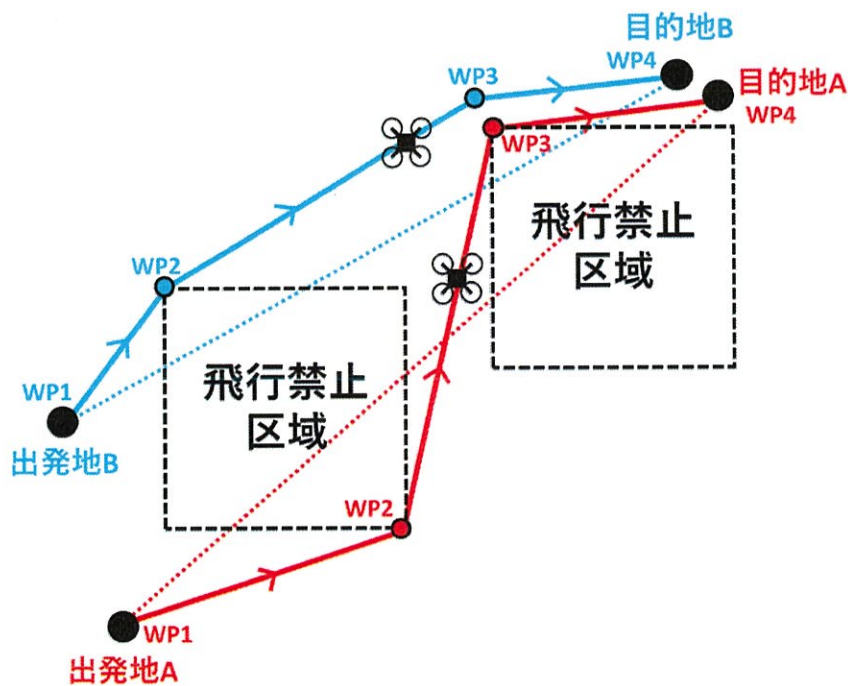


図 5 最短経路回避のウェイポイント

3.2. 片側(左側)回避

片側回避においても、最短経路回避の場合と同様に、出発地と目的地との間に飛行禁止区域が存在する場合には、飛行禁止区域の縁に沿って回避するようにウェイポイントを設定する。この際、最短経路回避では、時計回り、反時計回りのうち経路の長さが最短になるような回りで飛行禁止区域の縁に沿うようにウェイポイントの候補を生成した。一方で片側回避においてはたとえ飛行距離が長くなり、遠回りすることになるとしても、予め指定された側から飛行禁止区域を回避する。本研究では出発地と目的地間に飛行禁止区域が存在する場合には、常に飛行禁止区域の左側を飛行するように回避するように定めるため、左側回避と呼ぶこととする。図 6 のような場合では、飛行禁止区域の左側を通して回避するように飛行禁止区域の縁に沿った 9 つのウェイポイントの候補を生成する。これら 9 つのウェイポイントの候補に対して、最短経路回避の場合と同様にウェイポイントの最適化を行い、不必要なウェイポイントを削除する。不必要なウェイポイントが削除された結果、図 7 に示す 4 つのウェイポイントが確定される。この左側回避においても、出発地、目的地及び飛行時間帯が近い複数のフライトが同じ位置にあるウェイポイントに向かってしまい、飛行禁止区域の端がボトルネックとなることで、承認便数が減少してしまうことが考えられるため、最短経路回避の場合と同様に飛行禁止区域の外側に仮想的なレーンを設けることとする。

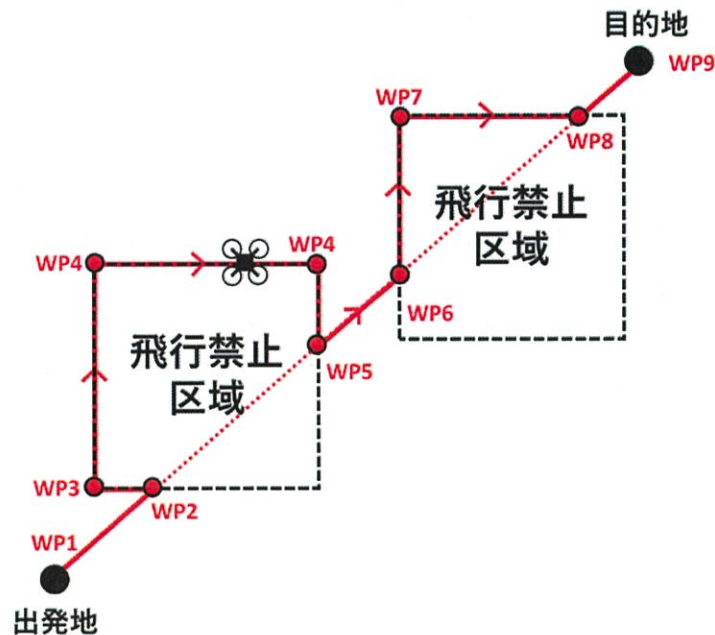


図 6 左側回避のウェイポイントの候補

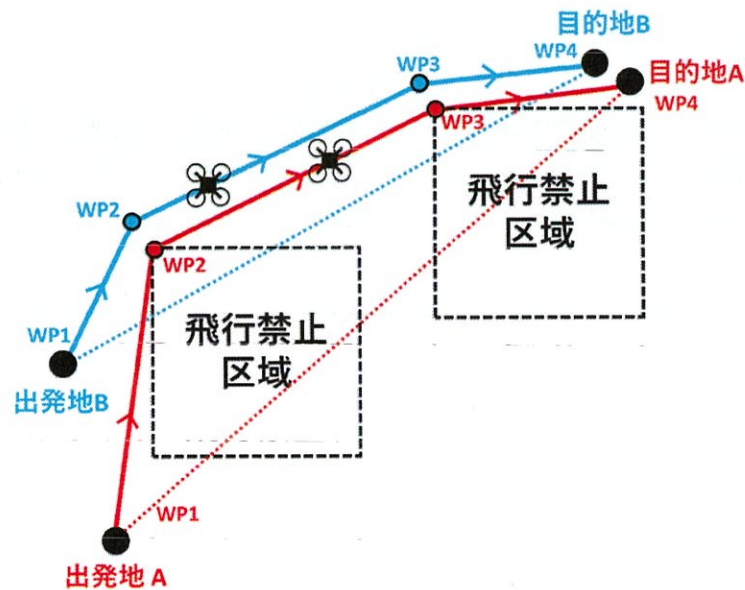


図 7 左側回避のウェイポイント

3.3. 片側(左側)迂回回避

片側迂回回避では片側回避の場合と同様に、予め定められた側を通り飛行禁止区域を回避して飛行を行う。本研究では常に左側を通して回避を行うため左側迂回回避と呼ぶこととする。左側回避との相違点として、元々の巡航経路上に飛行禁止区域が存在しない場合の経路作成方法が挙げられる。左側回避においては出発地と目的地間の直線経路上に飛行禁止区域存在しない場合、出発地から目的地上空まで直線的な飛行を行う。しかし、左側迂回回避においては、たとえ元々の UAS の巡航経路上に飛行禁止区域が存在しない場合でも意図的に近くにある飛行禁止区域のまわりを迂回するような飛行経路を作成する。図 8 のような場合、UAS は出発地から目的地まで飛行禁止区域と干渉せずに直線的な飛行が可能であるが、往路・復路ともに意図的にウェイポイント 2 とウェイポイント 4 を挿入し近くの飛行禁止区域を迂回するような飛行を行わせる。左側迂回回避を行うことで意図的に迂回する分、飛行距離の増加が予測されるが、飛行禁止区域まわりの流れがより強く形成されることによって承認便数が増加することが考えられる。

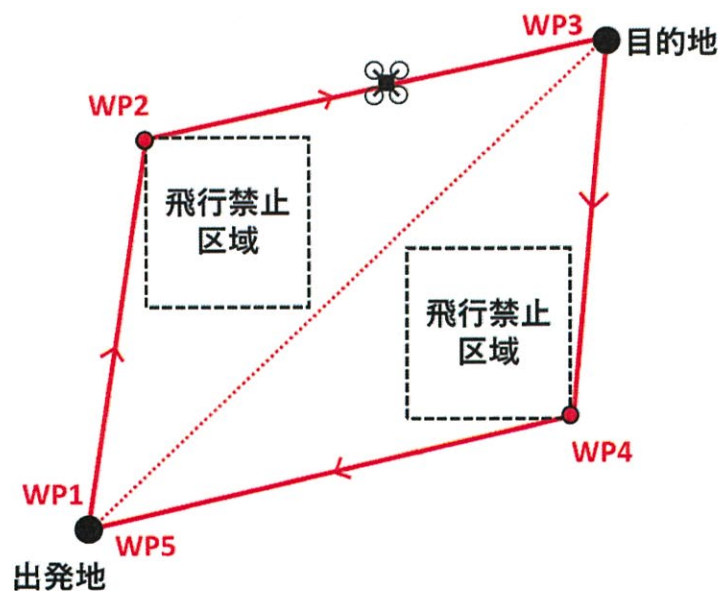


図 8 左側迂回回避のウェイポイント

3.4. 回避規則のまとめ

以上で説明した3つの回避規則に従い飛行禁止区域を回避した飛行例を図9-11に示す。最短経路回避では自機の飛行距離が最短となるように飛行禁止区域を回避するため、往路と復路で飛行禁止区域の同じ側を回避する。一方で図10に示す左側回避では、俯瞰すると飛行禁止区域のまわりを時計回りの線を描くように回避して飛行を行う。また、この時、一部のUASの元々の経路上に飛行禁止区域が存在せず、往路または復路において、飛行禁止区域の周辺で反時計回り方向に飛行するUASが見られる。このようなUASも図11に示す左側迂回回避を行った場合には最も近くに存在する飛行禁止区域の周りを意図的に迂回するように飛行するため、飛行禁止区域の周辺を時計回り方向に飛行し回避している。

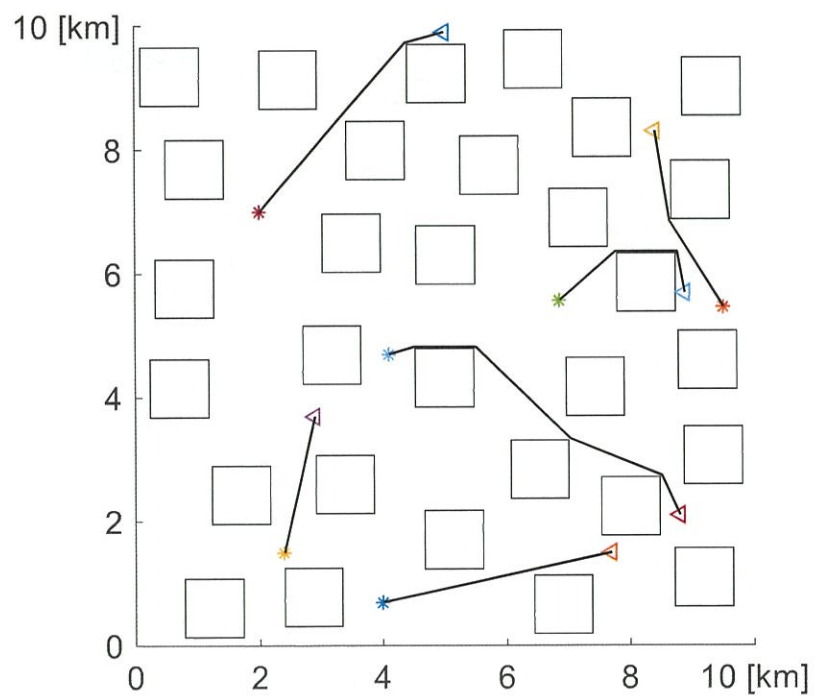


図 9 最短経路回避を行った場合の回避例

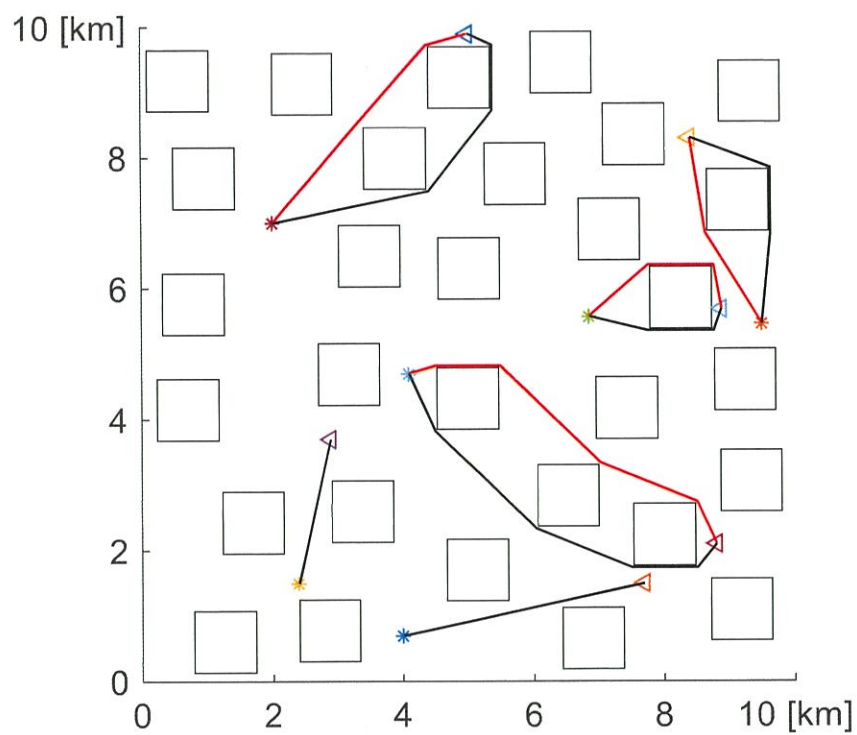


図 10 左側回避を行った場合の回避例

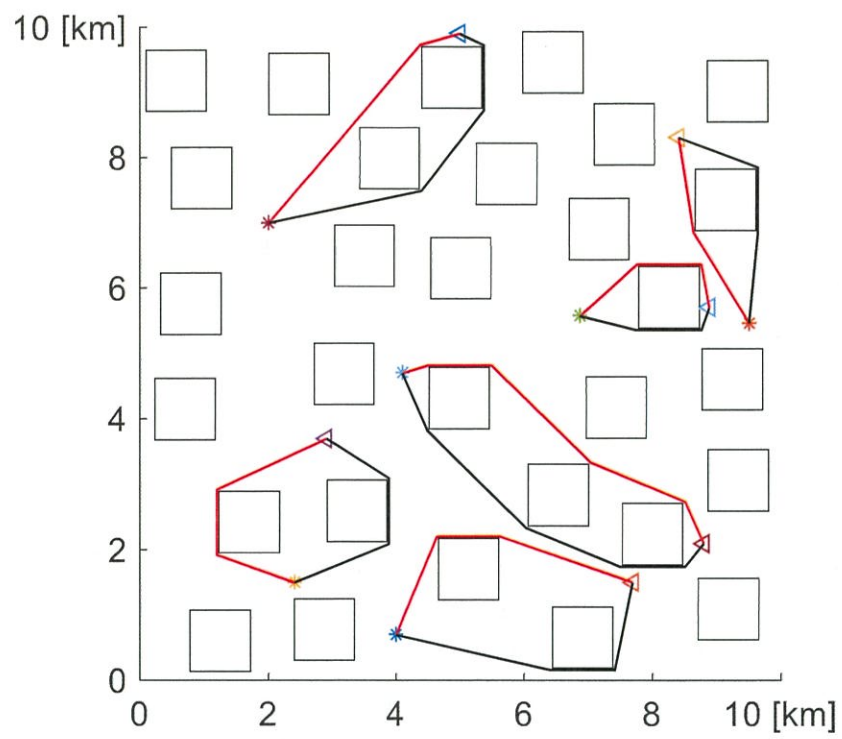


図 11 左側迂回回避を行った場合の回避例

4. シミュレーション結果

4.1. 飛行禁止区域の配置と承認便数

飛行禁止区域の数を N とし、シミュレーションによって得られた結果を図 12-19 及び表 1-2 に示す。図 12-14 にはある 1 回のシミュレーションにおける承認便数の時間推移を飛行禁止区域の回避規則ごとに示し、飛行禁止区域の数と回避規則の関係を明らかにする。図 15-17 では図 12-14 の結果を飛行禁止区域の数ごとに分類した結果を示し、回避規則が平均承認便数に及ぼす影響を比較する。図 12-17 において、いずれの回避規則でも 1000-2000[sec] では承認便数が定常状態になっていることが確認されるため、本研究では 1000-2000[sec] の承認便数の平均値を平均承認便数と定義する。表 1-2 にはそれぞれ 30 回ずつシミュレーションを行った際の平均承認便数と平均飛行距離の平均値を示す。括弧内の数値は最短経路回避を基準としたときの左側回避及び左側迂回回避の平均承認便数と平均飛行距離の増加率を示す。図 18-19 には、それぞれの回避規則における 30 回ずつのシミュレーションの平均承認便数と平均飛行距離を箱ひげ図で示す。本論文ではひげの上端は最大値、箱の上端は第三四分位数、箱の中央線は第二四分位数、箱の下端は第一四分位数、ひげの下端は最小値を示す。図 12 より、最短経路回避を行った場合、飛行禁止区域の数が増えるのに反比例して、承認便数が減少するという直感的な結果が得られた。一方で、回避方向を指定する左側回避及び左側迂回回避の場合は、飛行禁止区域が 10 個から 20 個に増加した際に、平均承認便数も増加するという結果が得られた。また、飛行禁止区域の数ごとに結果を分類した図 15-17 より、いずれの飛行禁止区域の配置においても最短経路回避の平均承認便数が最小で、左側迂回回避の平均承認便数が最大となっていることが確認できる。表 1-2 より、それぞれの飛行禁止区域の配置における、最短経路回避の平均承認便数と平均飛行距離を基準とした場合の左側回避及び左側迂回回避の平均承認便数と平均飛行距離の増加率を比較すると、左側回避を行うことで、平均飛行距離は飛行禁止区域が少ない順に 0.9%, 1.6%, 2.7% 増加していることがわかる。一方で、平均承認便数を見ても、飛行禁止区域 10 個, 20 個, 30 個の順に 9.6%, 18.2%, 23.2% 増加しており、いずれの飛行禁止区域の配置においても、平均承認便数の増加率は平均飛行距離の増加率を上回っていることがわかる。左側迂回回避においては、飛行禁止区域が少ない順に平均飛行距離が 18.0%, 6.3%, 2.7%, 平均承認便数が 33.0%, 39.2%, 39.1% と、左側回避の場合を上回る平均承認便数の増加率が得られており、意図的な迂回が承認便数を増加させたことが確認できる。意図的な迂回が承認便数を増加させた理由については以降の章にて詳しく考察する。また、本章で得られた結果がシミュレーション時間 3000 秒、飛行計画提出数 10,000 便という条件下だけで得られるものでなく、シミュレーション時間や提出便数を変更しても同じ大小関係が得られることを説明するために、図 20-22 にシミュレーション時間 6000 秒、提出便数 20,000 便のデータを示す。

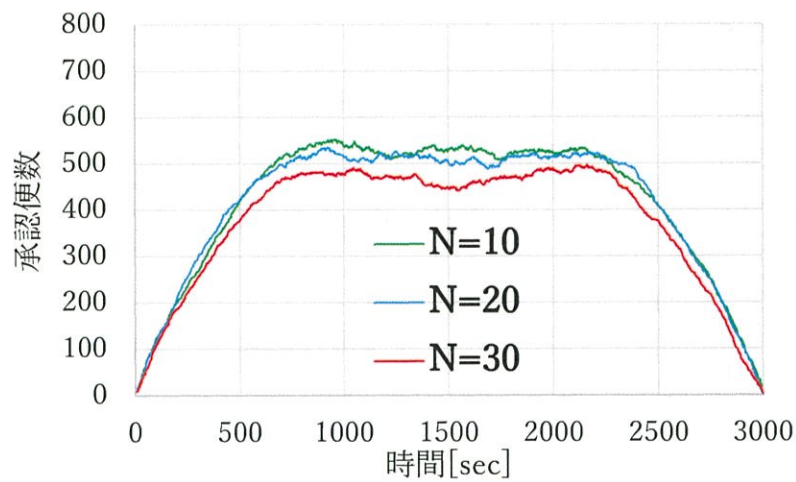


図 12 最短経路回避における承認便数の履歴

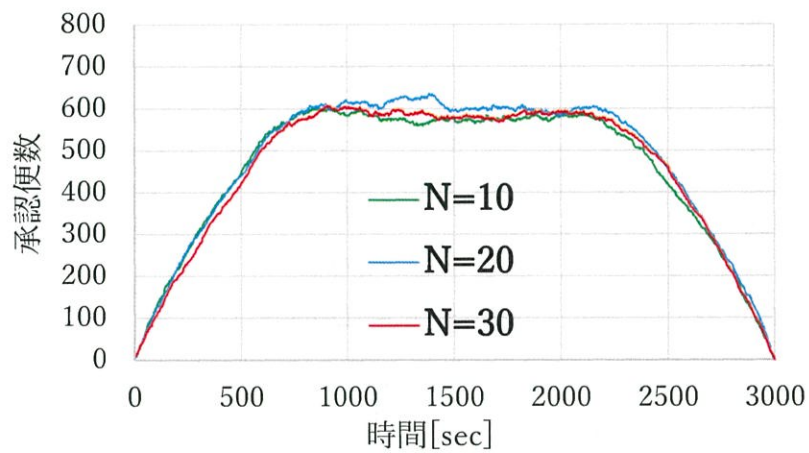


図 13 左側回避における承認便数の履歴

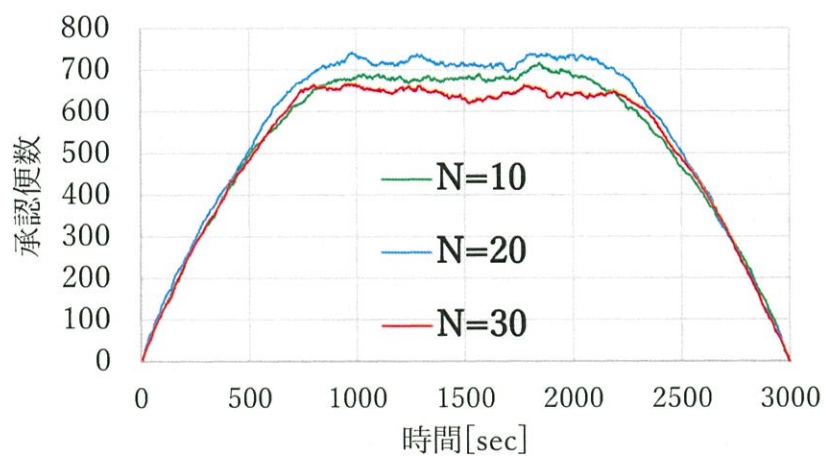


図 14 左側迂回回避における承認便数の履歴

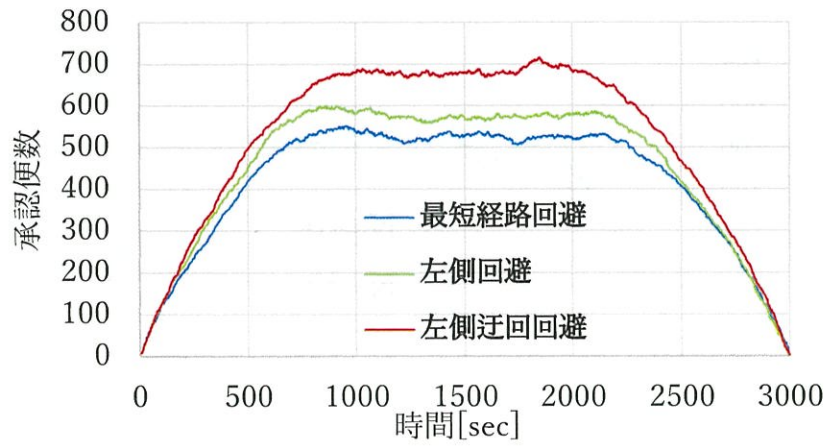


図 15 飛行禁止区域が 10 個の場合の承認便数の比較

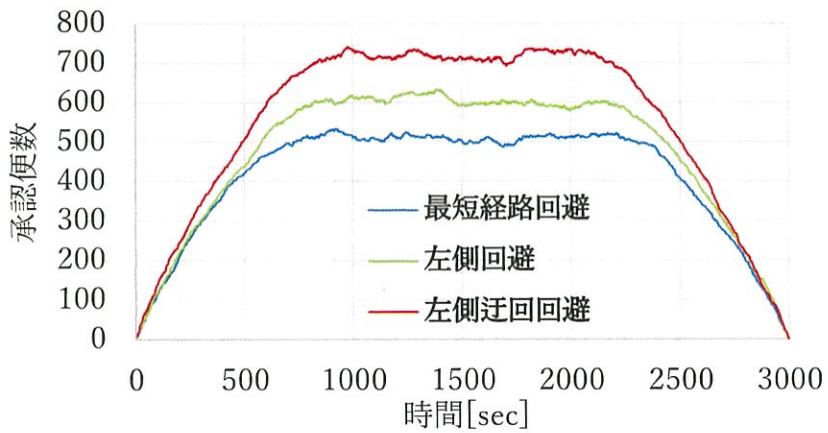


図 16 飛行禁止区域が 20 個の場合の承認便数の比較

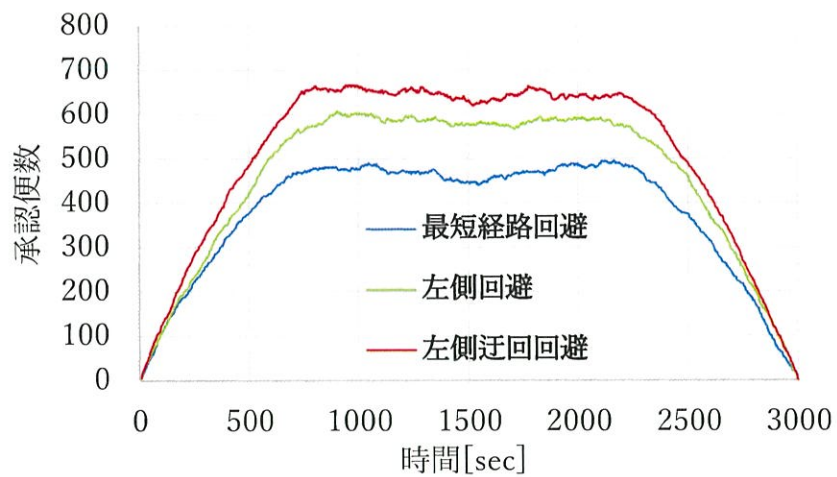


図 17 飛行禁止区域が 30 個の場合の承認便数の比較

表 1 定常状態における平均承認便数

飛行禁止区域の数	N=10	N=20	N=30
最短経路回避	520	507	465
左側回避	570[9.6%]	599[18.2%]	572[23.2%]
左側迂回回避	691[33.0%]	706[39.2%]	646[39.1%]

表 2 定常状態における平均飛行距離[m]

飛行禁止区域の数	N=10	N=20	N=30
最短経路回避	9985.2	10026.3	9988.7
左側回避	10073.7[0.9%]	10182.4[1.6%]	10261.0[2.7%]
左側迂回回避	11783.4[18.0%]	10653.8[6.3%]	10262.8[2.7%]

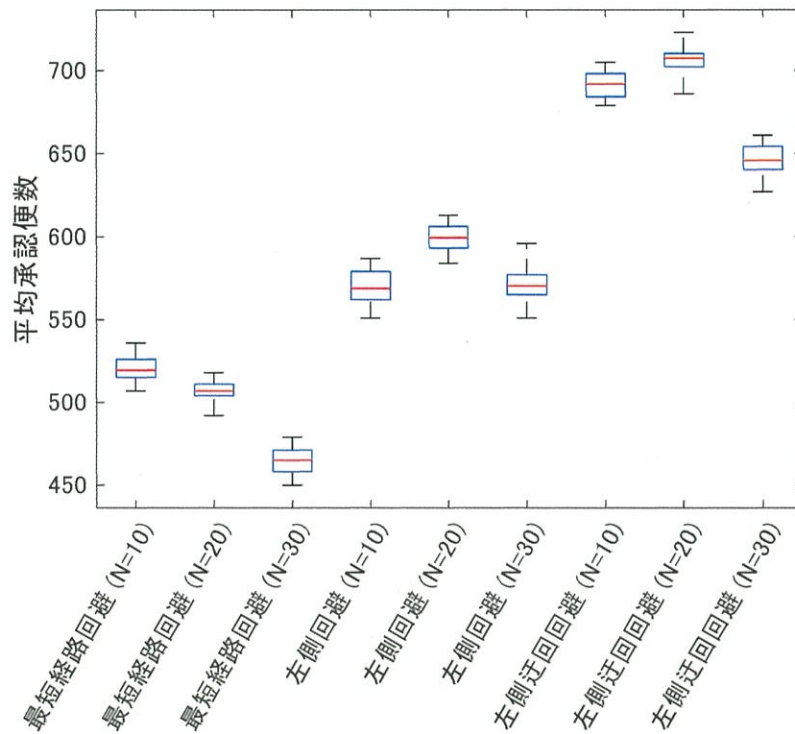


図 18 箱ひげ図による平均承認便数の比較

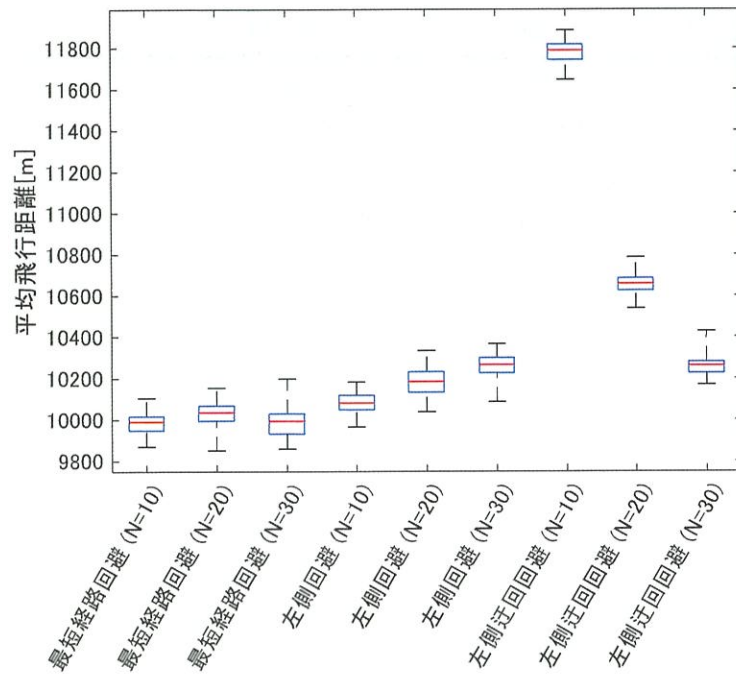


図 19 箱ひげ図による平均飛行距離の比較

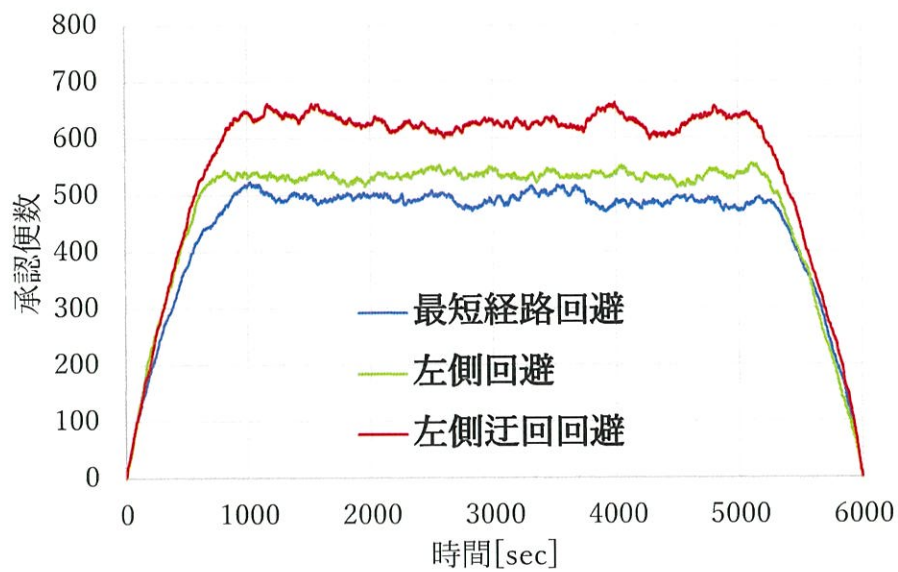


図 20 飛行禁止区域が 10 個の場合の承認便数の比較
(シミュレーション時間 6000[sec], 飛行計画提出便数 20,000 便)

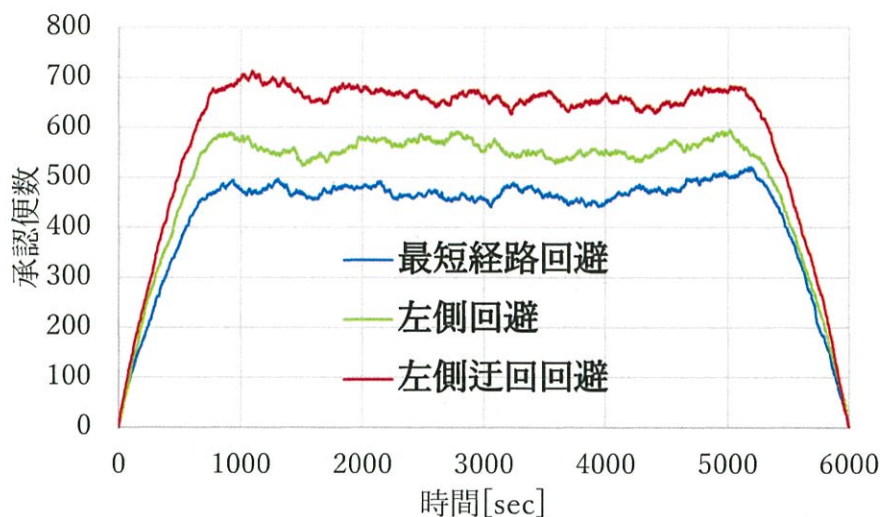


図 21 飛行禁止区域が 20 個の場合の承認便数の比較
(シミュレーション時間 6000[sec], 飛行計画提出便数 20,000 便)

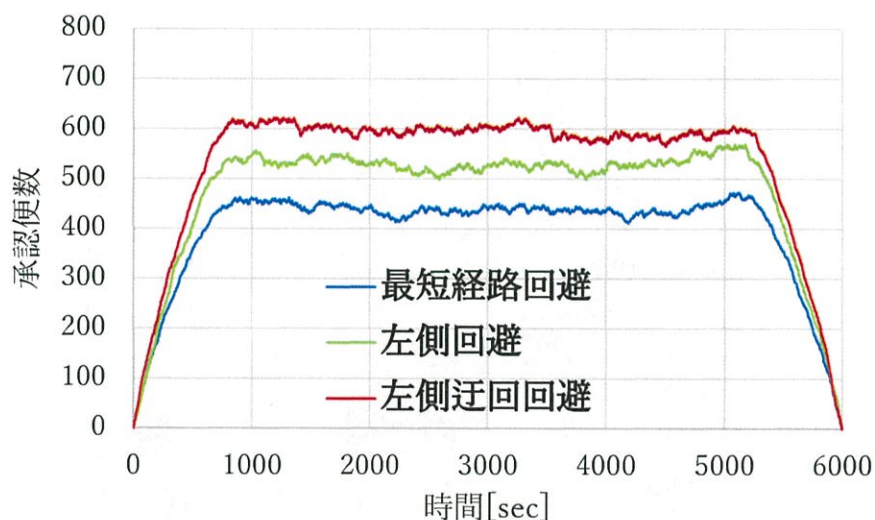


図 22 飛行禁止区域が 30 個の場合の承認便数の比較
(シミュレーション時間 6000[sec], 飛行計画提出便数 20,000 便)

4.2. 飛行軌跡の可視化

本章では、意図的な迂回が平均承認便数を増加させた理由について、飛行軌跡を可視化することによって説明する。まず、図 23-25 にある一回のシミュレーションの全 UAS の飛行軌跡を可視化した図を示す。これらの図から最短経路回避の場合と比べて、左側回避及び左側迂回回避を行った場合にはより飛行軌跡の密度が高いことが確認される。それぞれの UAS の飛行方位をより詳しく確認するために、定常状態のある 150 秒間の飛行軌跡だけを描写したグラフを図 26-28 に、図 26-28 の太線で囲った部分を拡大した図を図 29-31 に示

す。図 29 より、最短経路回避を行った場合には、各 UAS の飛行方位が時計回り方向及び反時計回り方向に入り乱れていることがわかる。一方で図 30 の左側回避の場合では、飛行禁止区域の周辺において同じ方向に飛行する UAS が多く見られる。これは予め飛行禁止区域の回避方向を指定したことにより、元々の経路上に飛行禁止区域が存在した UAS が飛行禁止区域の左側を回避するために同じ方向に飛行し、時計回りの交通流が形成されたことによるものと考えられる。このようにして、飛行方位が揃えられ、より規則的な交通流が生成された結果、正面から接近する UAS とコンフリクトを起こす UAS が減少し、承認便数がしたと考えられる。また、左側迂回回避については、元々の飛行経路上に飛行禁止区域が存在しない場合においても、飛行禁止区域周りの時計回りの交通流に従う形で飛行したため、より承認便数の増加につながったと考えられる。実際に図 31 においても、図 30 の左側回避の場合よりも更に多くの UAS が飛行禁止区域の周辺で時計回りに飛行していることがわかる。

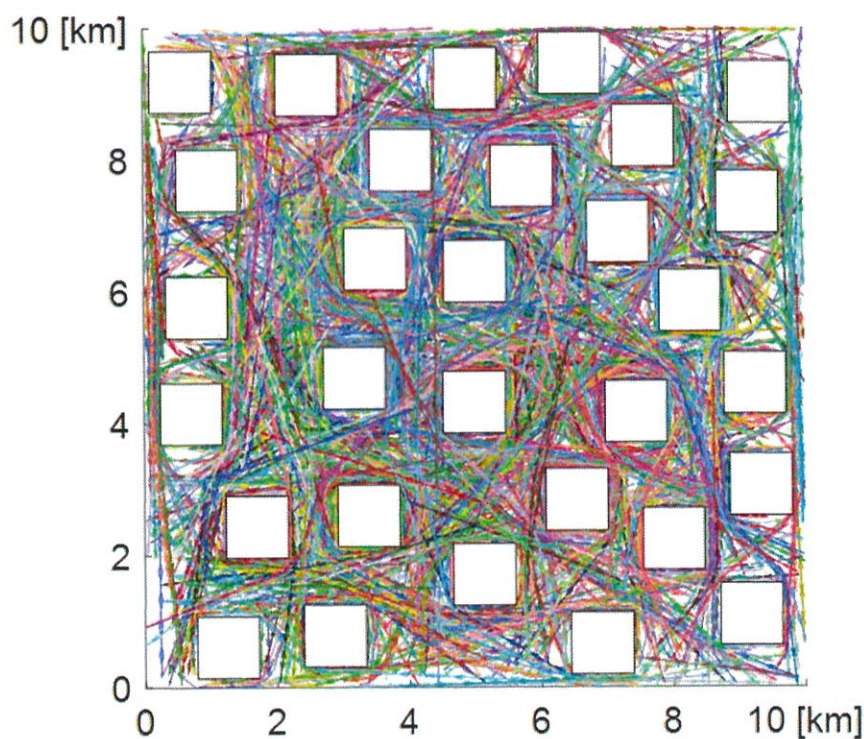


図 23 最短経路回避を行った場合の可視化された交通流(全時間)

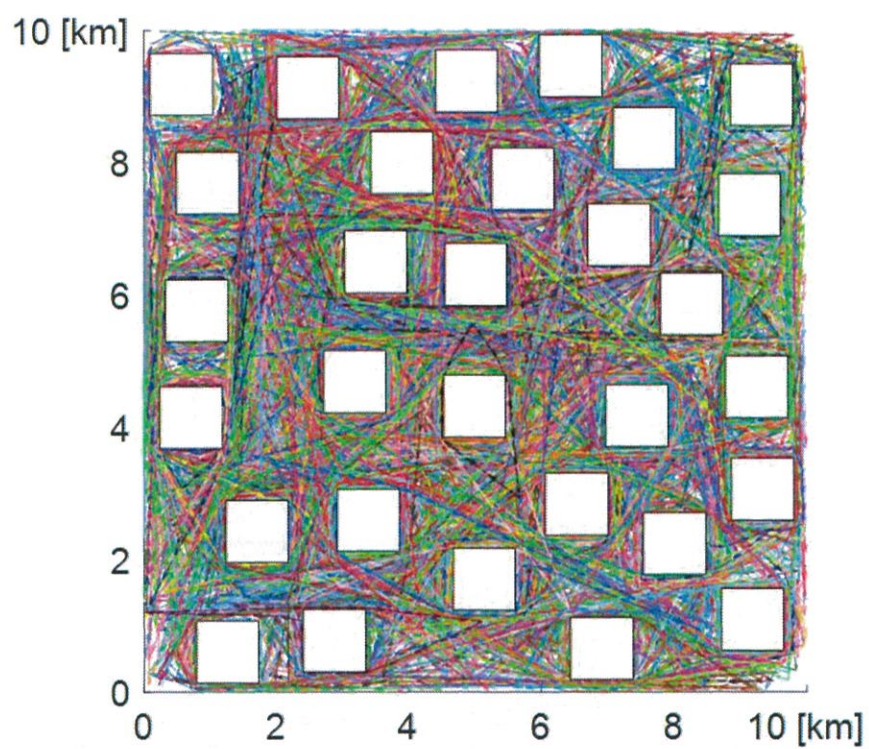


図 24 左側回避を行った場合の可視化された交通流(全時間)

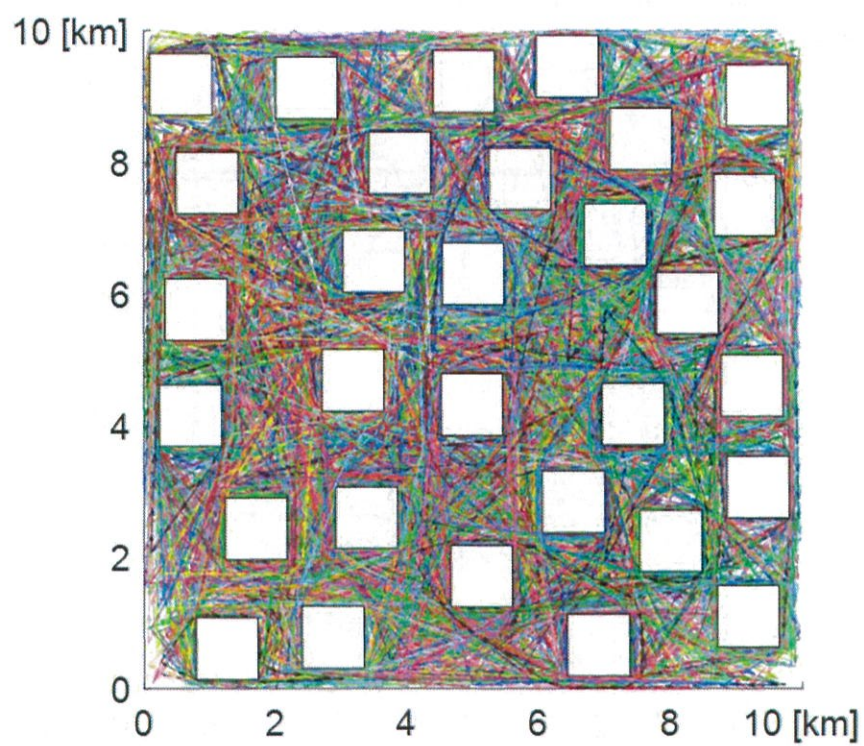


図 25 左側迂回回避を行った場合の可視化された交通流(全時間)

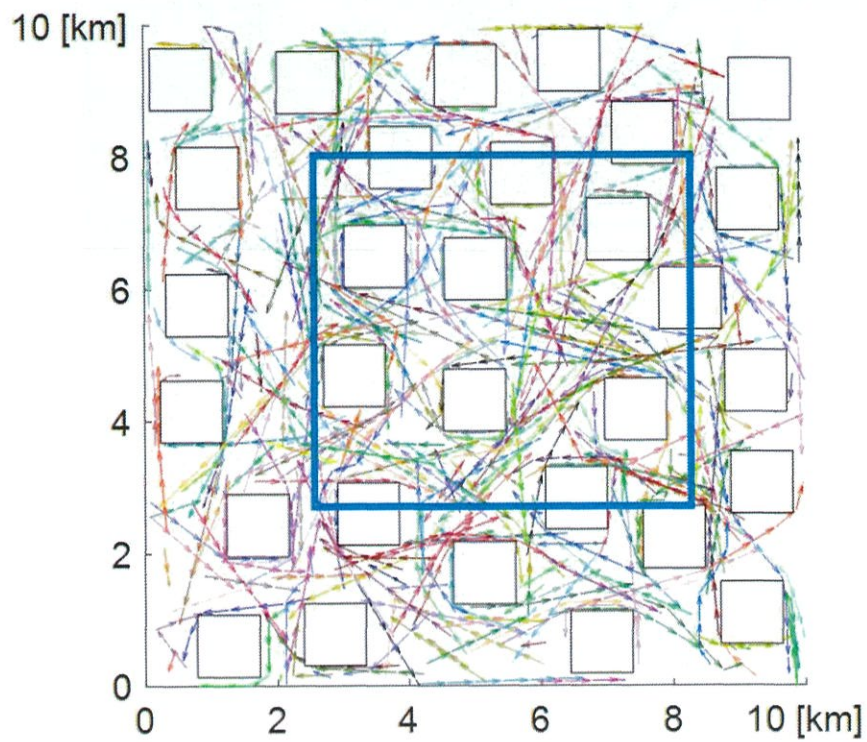


図 26 最短経路回避を行った場合の可視化された交通流(一定時間)

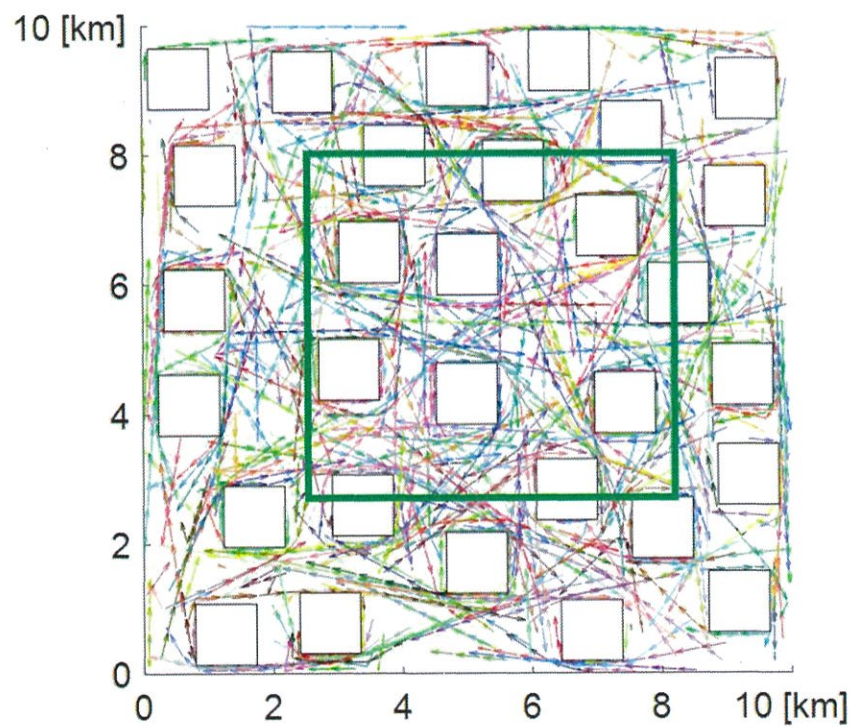


図 27 左側回避を行った場合の可視化された交通流(一定時間)

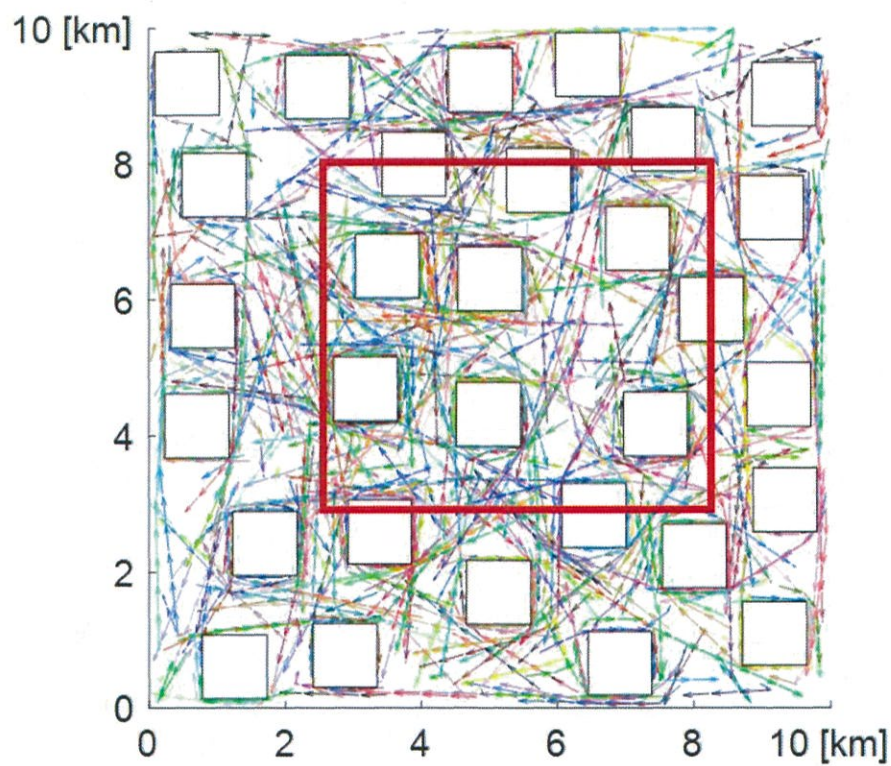


図 28 左側迂回回避を行った場合の可視化された交通流(一定時間)

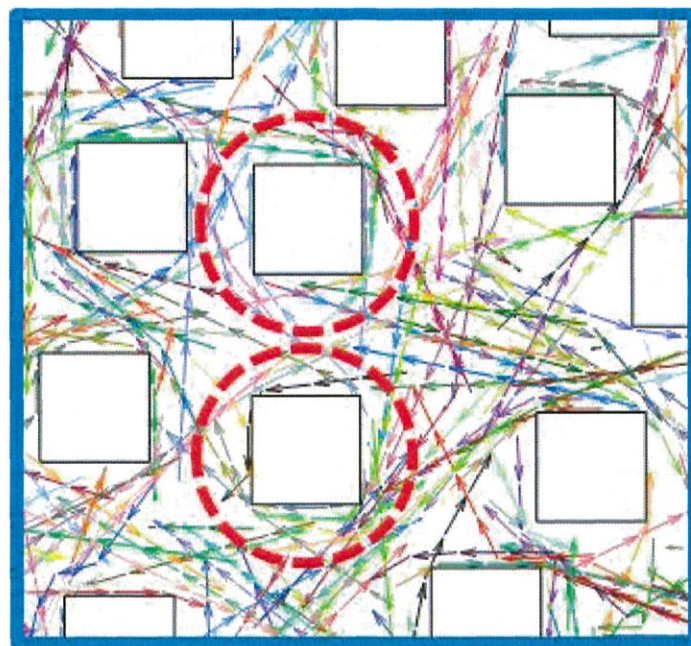


図 29 最短経路回避を行った場合の可視化された交通流(拡大図)

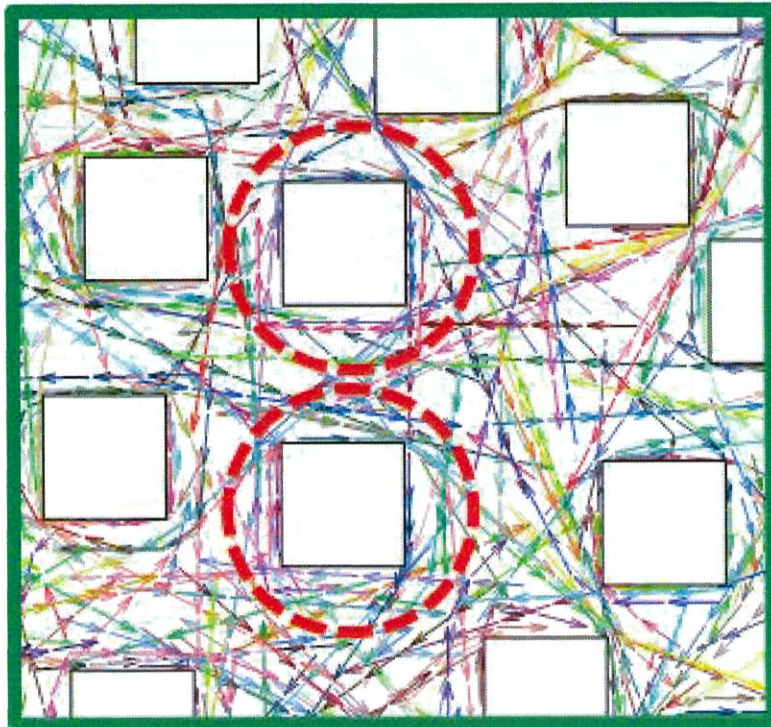


図 30 左側回避を行った場合の可視化された交通流(拡大図)

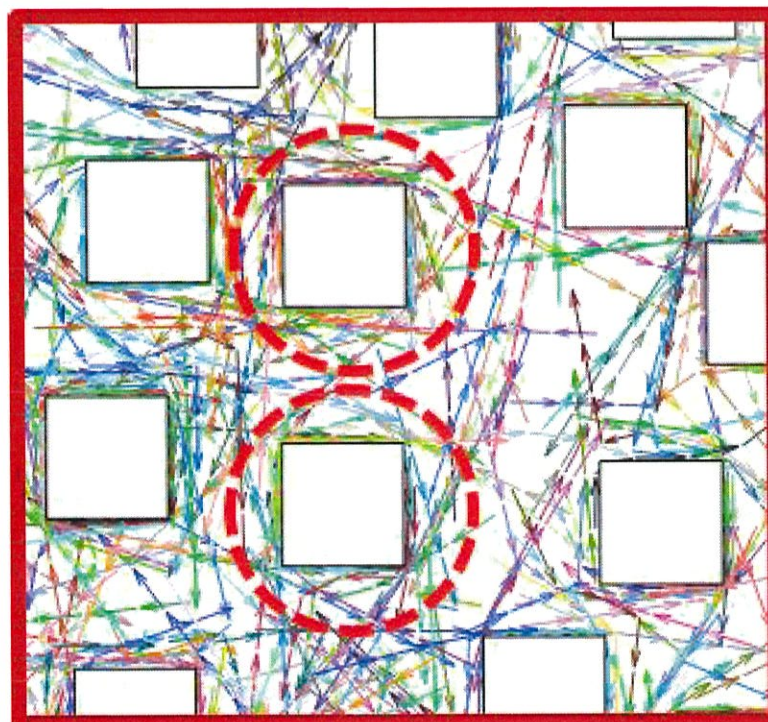


図 31 左側迂回回避を行った場合の可視化された交通流(拡大図)

4.3. 平均飛行距離と平均承認便数の関係の考察

表 2-3 で得られた平均飛行距離と平均承認便数の増加率をグラフ化したものを図 32-33 に示す。これらの図より、左側回避と左側迂回回避の両方で飛行禁止区域の数が多くなるほど、平均承認便数の増加率は上昇しており、いずれの飛行禁止区域の配置においても平均承認便数の増加率は平均飛行距離の増加率を上回っている。飛行禁止区域が 10 個及び 20 個の場合には左側迂回回避の平均飛行距離は左側回避の平均飛行距離を上回っている。これは意図的な迂回を行ったことから、飛行距離が長くなったと考えられる。しかし、飛行禁止区域が 30 個の場合には最短経路回避の平均飛行距離と比べた左側回避及び左側迂回回避の平均飛行距離の増加率は等しくなっている。この理由を説明するために図 34-36 にある一回のシミュレーションにおける、それぞれの回避規則に従った場合の交通流のヒートマップを、図 37 にはある一回のシミュレーションにおける、左側回避と左側迂回回避の飛行距離のヒストグラムを示す。図 34-36 より、最短経路回避に比べて、左側回避や左側迂回回避ではより密な交通流が確認できる。特に左側迂回回避においては飛行禁止区域の周辺が混雑していることがわかる。これは意図的な迂回によってより多くの UAS が飛行禁止区域まわりを飛行したためであると考えられる。この結果、飛行禁止区域の周りが混雑しすぎたために、距離の長いフライトが承認されにくくなり、図 37 のヒストグラムに示されるように、平均値を押し下げるような飛行距離 8000-10000[m] のフライトが多くなったと考えられる。

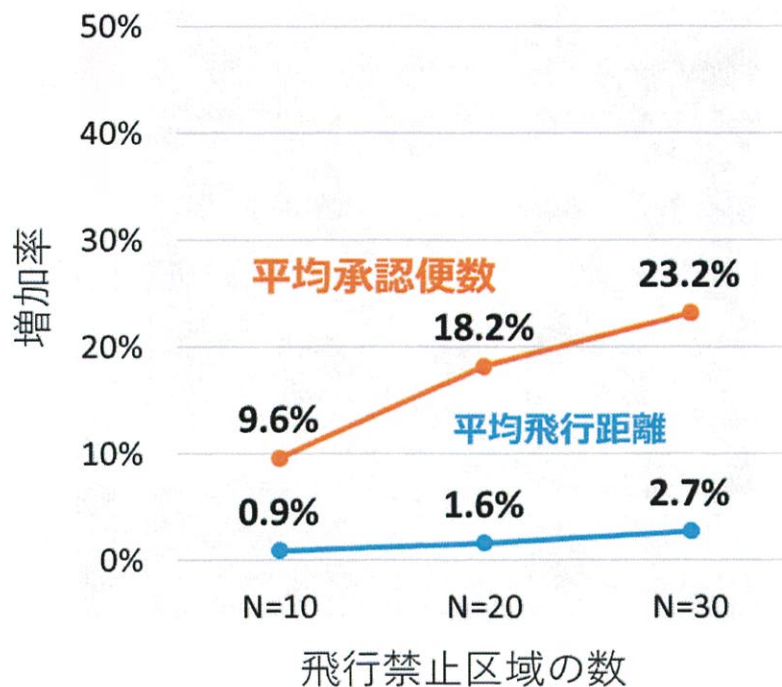


図 32 最短経路回避を基準とした左側回避の増加率

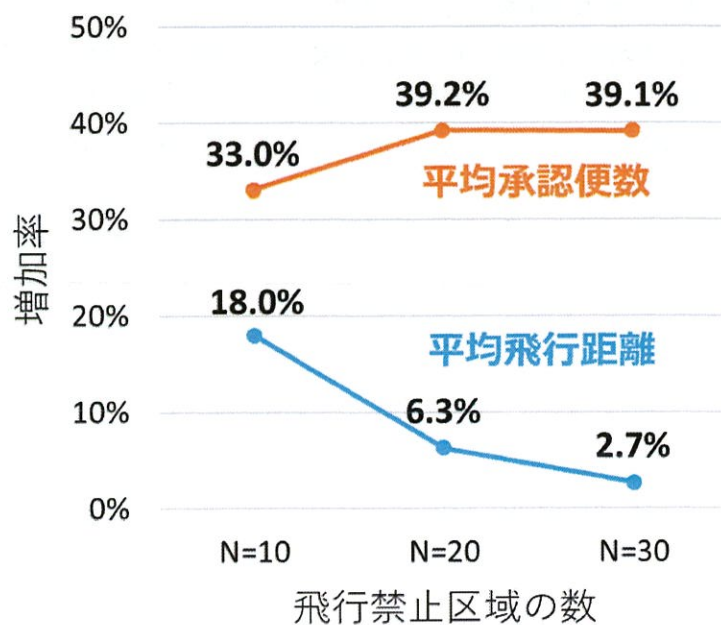


図 33 最短経路回避を基準とした左側迂回回避の増加率

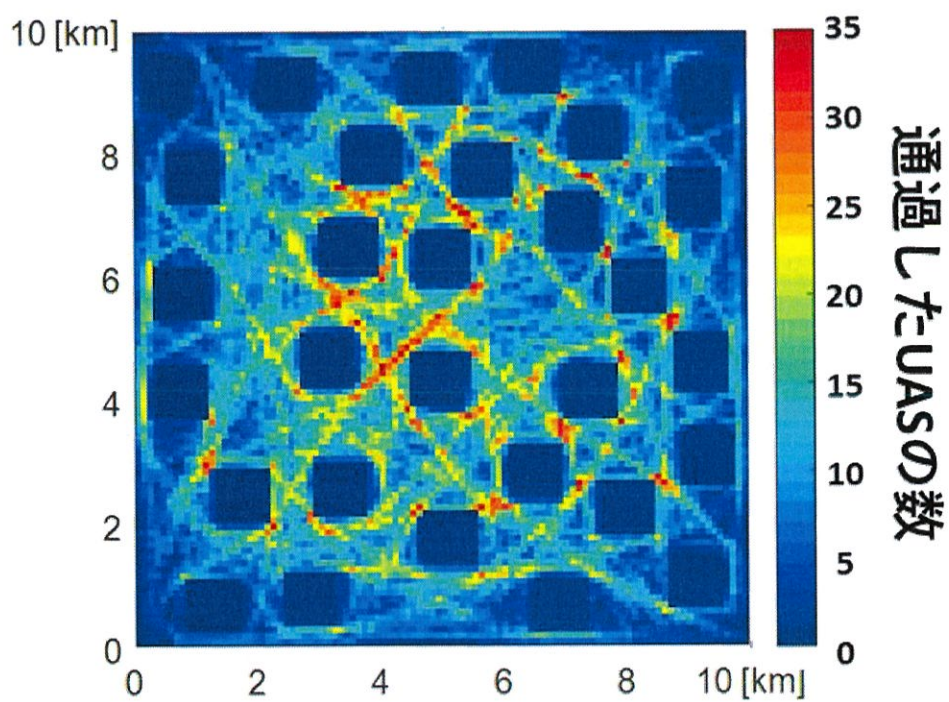


図 34 最短経路回避を行った場合の交通流のヒートマップ

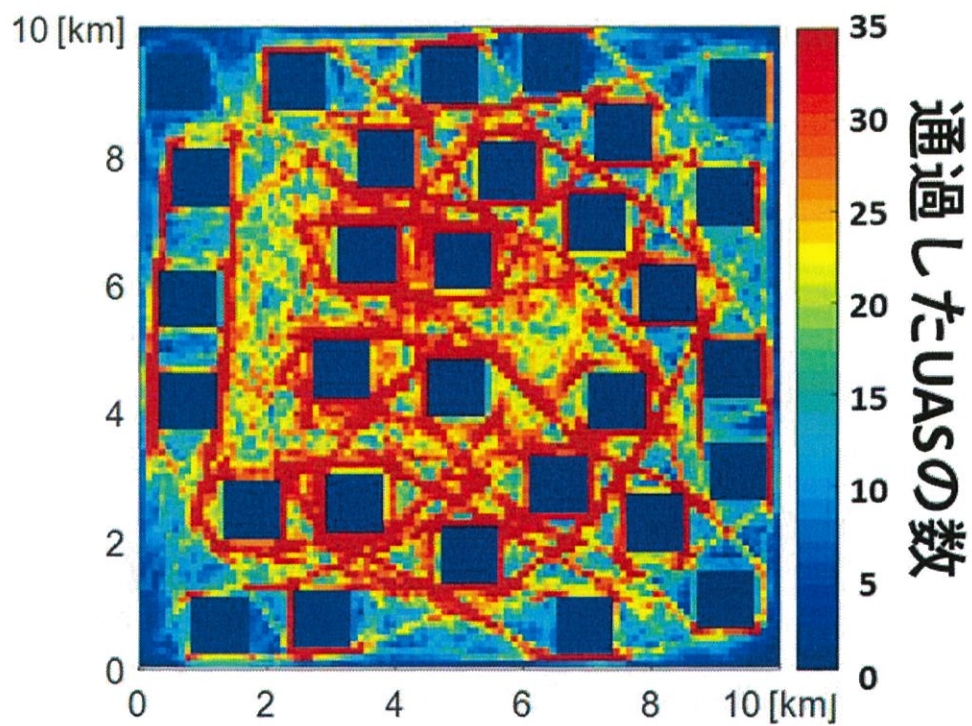


図 35 左側回避を行った場合の交通流のヒートマップ

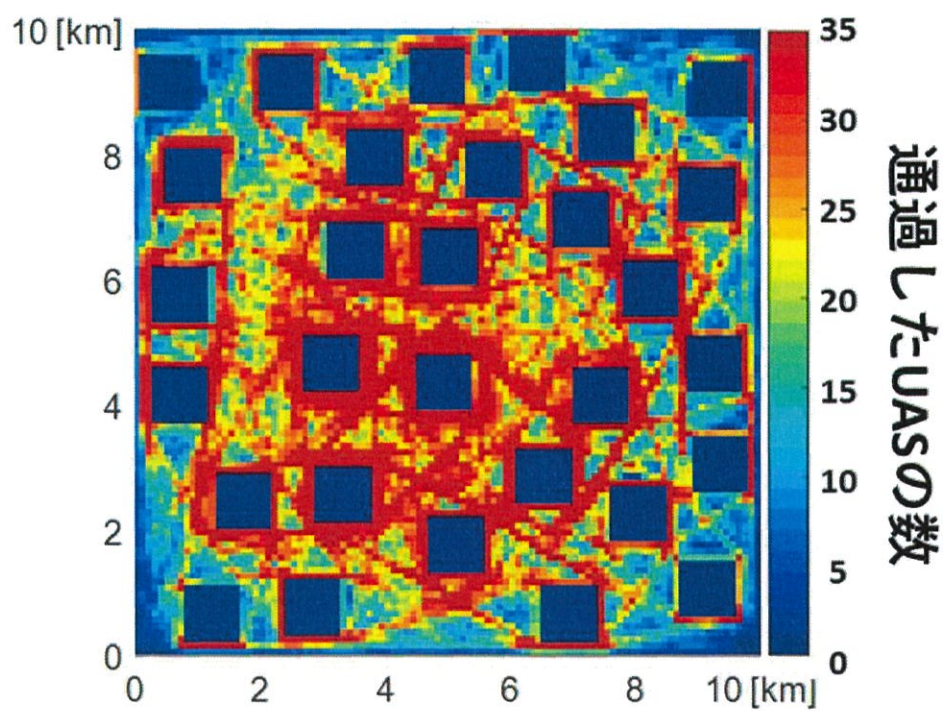


図 36 左側迂回回避を行った場合の交通流のヒートマップ

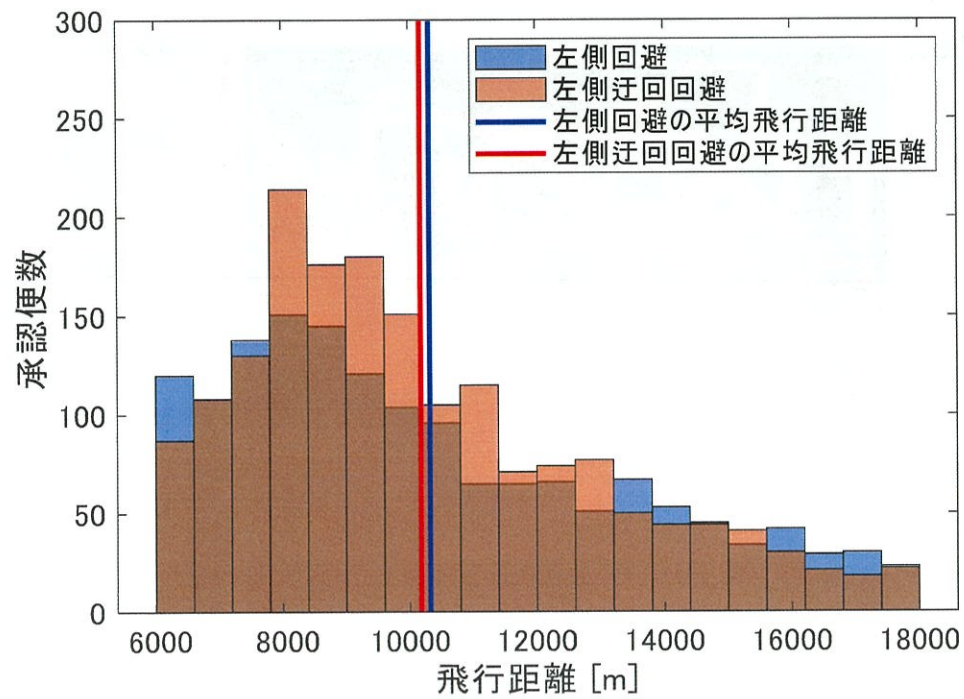


図 37 左側回避と左側迂回回避の飛行距離のヒストグラム

5. まとめと結論

本研究では飛行計画段階の層状空域を対象として、より多くの UAS の飛行計画が承認されるような交通規則の考案や複数の飛行禁止区域の設定を行い、定量的な評価を実施した。シミュレーションの結果から、最短経路回避を行った場合には飛行禁止区域の数が増えるほど、平均承認便数は減少する一方で、左側回避及び左側回避では飛行禁止区域が増加した際に平均承認便数も増加することが確認された。この理由として、交通流を可視化した図より、予め回避方向を指定する場合には、飛行禁止区域周辺において時計回り方向の交通流が形成され、正面から接近する UAS とコンフリクトを起こす UAS が減少したことが挙げられる。また、いずれの飛行禁止区域の配置においても、最短経路回避を行った場合に比べ、左側回避や左側迂回回避を行った場合には平均飛行距離が増加したが、平均飛行距離の増加率を上回る平均承認便数の増加率が得られることが確認された。

参考文献

- [1] Global UTM Association, "UAS Traffic Management Architecture," April 2017. [Online]. Available: <https://gutma.org/>
- [2] Civil Aviation Safety Authority of Australia, "Remotely piloted aircraft systems – operation of excluded RPA," Advisory Circular 101-10, 2016. [Online]. Available: <https://www.casa.gov.au/standard-page/casr-part-101-unmanned-aircraft-and-rocket-operations>
- [3] Transport Canada, "Guidance Material for Operating Unmanned Air Vehicle Systems under an Exemption," Advisory Circular 600-004, 2016. [Online]. Available: <https://www.tc.gc.ca/eng/civilaviation/opssvs/ac-600-004-2136.html>
- [4] Ministry of Land, Infrastructure and Transportation of Japan, Aviation Act amended by Act No. 67, 2015. [Online]. Available: http://www.shugiin.go.jp/Internet/itdb_gian.nsf/html/gian/honbun/houan/g18905075.htm
- [5] Civil Aviation Authority of Singapore, "Permits for Unmanned Aircraft Operations," Advisory Circular UAS-1(1), 2017. [Online]. Available: https://www.caas.gov.sg/docs/default-source/pdf/ac_uas-1_1_permits_for_unmanned_aircraft_operations.pdf
- [6] Civil Aviation Authority of United Kingdom, CAP 393: Air Navigation Order 2016, 2016. [Online]. Available: <https://www.caa.co.uk/News/Air-Navigation-Order-2016>
- [7] U.S. National Archives and Records Administration, "Small Unmanned Aircraft Systems," 14 C.F.R. pt. 107, 2016.
- [8] Prevot, T., Rios, J., Kopardekar, P., Robinson III, J.E., Johnson, M., and Jung, J., "UAS traffic management (UTM) concept of operations to safely enable low altitude flight operations," 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, page 3292, 2016.
- [9] SESAR. "U-space blueprint," 2017.
- [10] Sunil, E., Ellerbroek J. and Hoekstra, J.M., "CAMDA: Capacity Assessment Method for Decentralized Air Traffic Control," 8th International Conference for Research in Air Transportation, Barcelona, Spain, 2018.
- [11] Hoekstra, J.M., Ellerbroek, J., Sunil, E., and Maas, J., "Geovectoring: Reducing traffic complexity to increase the capacity of uav airspace," 8th International Conference for Research in Air Transportation, Barcelona, Spain, 2018.
- [12] Hoekstra, J. M., Maas, J., Tra, M., and Sunil, E., "How do layered airspace design parameters affect airspace capacity and safety?," 7th International Conference on Research in Air Transportation, 2016.
- [13] Sunil, E., Hoekstra, J.M., Ellerbroek, J., Bussink, F., Nieuwenhuisen, D., Vidosavljevic, A., and Kern, S., "Metropolis: Relating Airspace Structure and Capacity for Extreme Traffic Densities," 11th USA/EUROPE Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2015.
- [14] Tra, M., Sunil, E., Ellerbroek, J., and Hoekstra, J.M., "Modeling the Intrinsic Safety of

Unstructured and Layered Airspace Designs,” 12th USA/EUROPE Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2017.

[15] MAVIC 2 PRO/ZOOM User Manual v2.0, 2019

[16] Sedov L., and Polishchuk, V., “Centralized and Distributed UTM in Layered Airspace,” 8th International Conference on Research in Air Transportation, 2018.

[17] Duchamp, V., Sedov, L., and Polishchuk, V., “Density-Adapting Layers towards PBN for UTM,” 13th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Vienna, Jun. 18-21 2019.

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の武市昇教授には多くの助言をいただき、親身になってご指導いただきました。心より御礼申し上げます。研究室に配属されてから4年間、様々なことを学び成長できたと実感しています。また同期の山本聡史君と大嶋航太君、研究室の先輩方や後輩たち、そして諸岡さんにも心から感謝申し上げます。すばらしいメンバーと共に研究生生活を遅れたことを嬉しく思います。最後になりますが、これまで私を支えてくださった家族や先生方、友人などすべての人に深くお礼申し上げます。